

니었습니다. 라부아지에가 산소를 왜 '산소'라고 명명했는가만 기억해도 많은 것이 다시 보입니다. 일반 역사에서도 그렇듯, 승자의 관점에서만 쓰는 과학사는 진실성도 떨어지고 재미도 별로 없고 그리 유익하지도 않습니다.

#### 7장 요약

- 18세기 후반에 라부아지에가 플로지스톤 개념을 기반으로 한 화학체계를 배격하고 산소 개념을 중심으로 자신의 화학체계를 확립한 사건을 '화학혁명'이라 한다.
- 일반적 통념과는 달리 플로지스톤 이론도 나름대로 훌륭했고 설득력이 있었으며, 산소 자체를 포함한 많은 새로운 발견을 촉진했다. 특히 금속의 화학반응을 잘 설명해주었다.
- 라부아지에 이론에도 중요한 약점과 오류가 있었다. 그의 연소이론은 '칼로릭' 개념을 기반으로 했으며, 그가 지어낸 '산소'라는 신조어는 산소가 산의 기본이라는 잘못된 이론의 표현이었다.
- 필자가 판단하건대 미결정 상태로 간주되었어야 할 상황에서 라부아지에 학파가 벌인 캠페인의 성공으로 화학혁명이 이루어졌다. 플로지스톤 패러다임도 함께 존속했다면 화학은 더 성공적으로 발전했을 것이다.
- 과학사에서 대부분의 승패는 잘 들여다보면 간단하지 않고, 그 역사를 승자의 입장에서만 보면 재미도 없고 이득도 없다.

#### 8장

## 물은 H<sub>2</sub>O인가?

7장에서는 과학사에서의 승패가 간단하지 않고, 그 역사를 승자의 입장에서만 보는 것은 재미도 없고 이득도 없다고 말했습니다. 이번에는 약간 초점을 바꿔서, 굳게 받아들여진 지식 자체도 재조명할 필요가 있다고 강조하고 싶습니다. 과학에서 받아들여진 지식을 철학적으로 재조명한다는 것은 그 지식이 과연 제대로 정당화되어 있는가를 재고하는 일입니다. '우리가 그것을 어떻게 알지요?' 하고 다시 묻는 일입니다. 과학사적인 관점에서는 그 지식이 처음 정립되었을 때 어떤 기준으로 받아들여졌는지를 묻습니다. 그 때 사용된 기준이 적합했는지를 다시 평가하자고 할 수도 있고, 그러면 1부에서 논의했던 모든 철학적 문제들이 다시 다 등장합니다.

또 재미있는 것은, 어떤 과학지식이 처음에 왜 받아들여졌는지를 지금은 까맣게 잊어버린 경우가 많습니다. 그렇다면 우리는 과학지식을 뚜렷한 이유도 모르고 신봉하고 있다는 이야기인데, 그

런 것을 정말 지식이라고 할 수 있는지도 의문스럽습니다. 생각해 보면, 우리 현대인들은 참 많은 과학적 내용을 상식적으로 알고 있습니다. 지구는 태양의 주위를 돌고, 유전은 DNA분자를 통해 이루어지고, 공룡은 옛날 옛적에 살다가 멸종했고……. 그런데 사실은 쉽지 않은 이야기들입니다. 이런 지식을 모르는 사람을 우리는 비웃고, 그런 무식한 사람들이 아직 있다며 개탄도 합니다. 예를 들어 최근의 한 여론조사 결과에 따르면 미국인의 26퍼센트는 아직도 태양이 지구 주위를 돈다고 생각하고 있고, 52퍼센트는 인류가 다른 생물에서 진화했다는 것을 모른다고 합니다.<sup>1</sup> 이런 추세를 보고 이러다기는 사회가 저질적으로 변하지 않겠느냐는 우려들도 합니다.

그러나 과학지식을 그렇게 중요시하는 사람들도 과학적 상식을 과학자들이 처음에 어떻게 정립했는지는 잘 모릅니다. 좀 유식한 일반인들에게 물어봅시다. 우리가 정말 어떻게 해서 태양이 지구 주위를 도는 것이 아니라 지구가 태양 주위를 돈다는 것을 아는 지 말이지요. 그걸 확실히 아는 사람은 몇 없습니다. 많은 경우 과학자들조차도 과학상식의 근본은 모릅니다. 여기서 과학사와 과학 철학의 역할이 대두됩니다. 지식을 어떻게 얻고 정당화하는가, 그 과정을 알면 우리가 가진 지식의 질이 높아지고 지식을 더 아끼게 됩니다. 3장에서 나온 온도계 이야기에서 그런 느낌을 조금 받았기를 희망합니다. 그 느낌을 이번 장에서는 또 다른 아주 기초적인 예를 들어 더 자세하고 깊게 전달하고자 합니다.

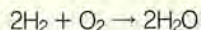
## 물이 $H_2O$ 라는 것을 어떻게 아는가

물이  $H_2O$ 라는 것, 더 정확히 말해 물분자가 수소원자 두 개와 산소원자 한 개가 합쳐져 이루어졌다는 것은 그야말로 삼척동자도 다 아는 과학상식의 대표적 예입니다. 그런데 생각해 보면, 삼척동자도 다 아는 것에는 문제가 있습니다. 왜냐하면 어린애들이 그걸 자기들이 알아냈을 리는 없고, 그냥 주입식 교육을 받아서 암기하고 있는 것뿐이니까요. 현대과학을 믿는 우리는 물질이 대부분 분자로 이루어져 있고, 또 그 분자는 원자들이 모여 만들어진 것이라고 상식적으로 받아들입니다. 대부분의 사람들은 눈으로 직접 볼 수도 없는 원자나 분자가 정말 있고 또 이러이러한 모양으로 생겼다는 것을 과학자들이 그렇다고 하니까 종교를 믿듯 이유를 따지지 않고 무조건 믿는 것입니다. 우리가 어떻게 그런 것들을 알 수 있냐고 물어보면, 어린이들이나 일반 사람은 말할 것도 없고 과학 교육을 상당히 받은 사람들도 쉽게 대답하지 못하는 경우가 많습니다. 종교적인 문제라면 이유를 몰라도 믿는 것이 원칙일지 몰라도 과학에서는 이유를 알고서 믿어야 할 텐데 사실 우리는 모르고 믿습니다.

다들 물을  $H_2O$ 라고 알고 있는데, 이 분자식을 어떻게 아는지 학생들에게 물어봅시다. 아마 대답하지 못할 것입니다. 학교에서 그 이유는 제대로 배우지 않습니다. 이유를 따지는 대신 학생들은 우선 수소는  $H_2$ , 산소는  $O_2$ , 물은  $H_2O$  하는 식으로 배웁니다. 그다음에는 반응식 맞추는 것을 배웁니다. 수소와 산소가 화합해서 물



이 되니까, 그 화학반응은 정확히 어떻게 될까요?  $H_2$ 와  $O_2$ 가 합쳐서  $H_2O$ 가 되려면 산소원자 하나당 수소원자가 두 개 있어야 하겠지요. 그래서 이렇게 씁니다.



그렇게 식을 맞추어내는 것은 똑똑한 학생이면 금방 배웁니다. 그리고 나서 더 복잡한 공식을 맞추어내는 훈련을 받습니다. 이렇게 해서 주입식 교육이 시작됩니다. 문제 푸는 데 집중하다 보면 ‘어, 물이 정말  $H_2O$ 라는 것을 어떻게 알지?’ 하는 질문은 전혀 하지 않게 됩니다.

정말 똑똑한 학생들한테 물어본다고 합시다. ‘물의 분자식이  $H_2O$ 라는 것을 어떻게 알지?’ 그러면 그 학생들은 이렇게 대답할 것입니다. 수소를 연소시키는 실험을 해보면, 산소와 수소가 결합하는 질량비가 8 대 1입니다(즉, 산소 8그램과 수소 1그램이 합쳐지면 9그램의 물이 만들어진다는 관측결과를 말합니다). 거기다가 중요한 사전 지식을 더합니다. 산소의 원자량이 16이고 수소의 원자량이 1이라는 것은 찾아보면 금방 나옵니다(여기서 원자량이란, 원자 하나하나의 질량을 말하는 것인데, 대략 수소를 기준으로 해서 1로 정한 것입니다.) 그러면 이제 결론을 내릴 수 있습니다. 산소원자가 수소원자보다 열여

\* 처음에는 그렇게 했었고, 나중에는 기준을 약간 바꿔서 탄소의 동위원소  $^{12}C$ 의 원자량을 12로 정하면서 수소의 원자량은 1.008이 되었다.

섯 배나 무거운데, 이 두 물질이 8 대 1의 질량비율로밖에 합쳐지지 않는다는 것은, 수소원자 두 개가 산소원자

한 개와 합쳐지기 때문이라고 추론할 수 있습니다(그러면 총 질량비는 16 대 2, 즉 8 대 1이 됩니다). 다시 말해 물의 분자식이  $H_2O$ 라는 것입니다.

그런데 방금 ‘사전지식’이라고 했는데, 산소의 원자량이 수소의 열여섯 배라는 것은 또 우리가 어떻게 압니까? 그렇게 물어보면 우리 똑똑한 학생들은 또 정연한 논리를 펼칠 것입니다. 산소와 수소가 8 대 1의 질량비로 결합하는 것은 관측사실을 통해 알고, 물의 분자식이  $H_2O$ 라는 것을 이용하면, 결론을 내릴 수 있습니다—원자량이 16 대 1이어야만 관측되는 질량비가 산소 8 대 수소 1이 된다고 말이지요. 이번에는  $H_2O$ 가 사전지식입니다. 완벽한 순환 논리입니다. 그러니까 공부 잘하는 학생들은 이 순환논리를 일관성 있게 재생해내는 것을 배우고, 순환논리에 매이면 생각은 마비됩니다. 화학은 생각할 필요 없고 다 당연하고 재미는 하나도 없는 과목으로 전락하고 맙니다.

## $H_2O$ 의 역사: 돌튼과 아보가드로

역사적 기원으로 돌아가보겠습니다. 유럽의 과학자들은 1800년 경부터 화학과 물리학에서 심도 있는 원자이론을 발전시켰습니다. 당시 원자는 정말 직접 관측할 수 없는 것이었습니다. 요즘은 기술이 발달해서 주사 터널링 현미경 scanning tunneling microscope 같은 것을 사용해서 원자의 이미지를 잡아내기도 하지만, 그것도 특정한 상

태의 물질이나 가능하지, 예를 들어 물 한 컵이 있는 데다 현미경을 들이댄다고 해서 물분자의 모습이 그대로 보이지는 않습니다. 오늘날 21세기의 상황도 그러한데, 처음 화학적 원자론이 나왔던 200년 전 그 옛날에 원자가 어떻게 생겼고 어느 분자 내에 어떤 원

#### 돌튼 John Dalton, 1766-1844

아주 입지전적인 인물입니다. 잉글랜드 북서부의 이글스필드 Eaglesfield 라는 조그만 마을에서, 가난한 직공의 막내아들로 태어났습니다. 돈도 없고 근처에 학교도 제대로 없어서 초등학교밖에 못 다녔고, 대학 문턱에도 못 가보았습니다. 또한 돌튼은 아무리 잘나서 장학금을 탔더라도 대학을 갈 수는 없었습니다. 왜냐하면 그 당시까지 잉글랜드에 대학이란 옥스퍼드와 케임브리지밖에 없었고, 두 군데 다 영국 국교인 성공회에 속한 사람이 아니면 다닐 수 없게 되어 있었는데, 돌튼 집안은 독실한 웨이커 교도였기 때문입니다. (영국도 그런 점에서는 후진국이었습니다. 그러한 폐단을 없애자고 1820년대에 가서 만든 것이 제가 2010년까지 몸담고 있던 런던 대학입니다.) 돌튼은 모든 과학을 독학으로 배웠고, 학교도 제대로 다니지 못했지만 선생이 되어 생계를 꾸려나갔습니다. 결국은 대도시인 맨체스터에 정착했고, 거기서 존경받는 유지가 되어 사망 시 시민장을 치렀고 무려 4만여 명이 조문을 다녀갔다고 합니다.

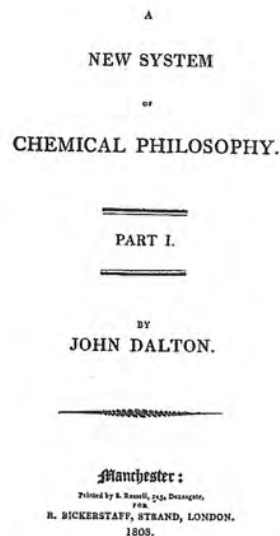


▲ 그림 8-1 화학 실험에 사용하기 위해 늪에서 메탄가스를 채취하고 있는 돌튼  
in Manchester Town Hall © Ford Maddox Brown

자들이 몇 개씩 있는지 등을 과학자들은 도대체 어떻게 알아냈을까요?

당시 화학계에서 선구적인 역할을 했던 영국의 과학자 돌튼은 ‘화학적 원자론의 아버지’라고도 종종 불립니다. 이 돌튼이 1808년에 출간해서 이제는 과학의 고전으로 굳은 『화학철학의 새로운 체계 A New System of Chemical Philosophy』라는 책이 있습니다. 이 책의 표지를 보면 (그림 8-2 참조) 저자의 특유성이 드러납니다. 그 당시 학술서에는 저자의 이름 다음에, 어떤 학위가 있는지 어느 대학의 교수라든지 어느 학회의 회원이라든지 하는 약력을 전부 표기하는 것이 관례였습니다. 그러나 돌튼은 그냥 ‘존 돌튼’입니다. 아무 학위도 지위도 없었던 것이지요. 이런 사람이 내놓은 이론도 존중받을 수 있었다는 것은 당시 영국 과학계의 좋은 특성이었던 것 같습니다.

그 책에 돌튼은 그림 8-3과 같은 원자와 분자 그림을 그려놓았습니다. 각각의 화학원소를 구성하는 원자를 기호를 넣은 동그라미로 나타냈습니다(1번이 산소, 2번이 수소, 3번이 질소, 4번이 탄소 등등). 원소를 36가지 표시했고, 37번부터는 화합물인데 이 37번이 돌튼이 그려놓은 물분자입니다.  $H_2O$ 가 아니라  $HO$ 로 표시되어 있



▲ 그림 8-2 돌튼 책 표지



지요, 그러면 이 원자론의 아버지는 현대의 어린아이보다도 아는 것이 없고 멍청했다는 이야기인가요? 물론 아닙니다. 사실 돌턴은 논리가 정연했습니다. 자기가 원자론을 내놓기는 했지만 그것이 가설이라는 것을 확실히 인정했고, 또 당시 누구도 원자의 개수를 하나하나 셀 수 없다는 것을 너무나 잘 알았기 때문입니다. 그래서 돌턴은 분자들은 가능한 한 가장 단순한 구조로 이루어졌다는 '최대 단순성의 규칙'이라는 가정을 자신의 원자이론에 추가했습니다. 두 가지 원소가 합쳐져 이루어지는 가장 기본적인 화합물은, 그 두 원소의 원자들이 1 대 1로 결합해서 된 것으로 생각하는 것이 자연스러웠습니다. 물이 바로 그런 경우였는데, 돌턴이 원자이론을 처음 발표한 시절에는 수소와 산소의 화합물은 그 한 가지밖에 알려져 있지 않았기 때문입니다.\* 돌턴이 단순성을 가정한 데는 더 깊은 이론적 이유도 있었습니다. 서로 다른 종류의 원자 간에는 화학적 친화력이 있다고 보았고, 같은 종류의 원자 간에는 친화력은 없고 도리어 척력만이 있다고 보았습니다.\*\* 그래서 다른 종류의 원자 간에는 1 대 1의 결합이 가장 안정적이고, 그다음

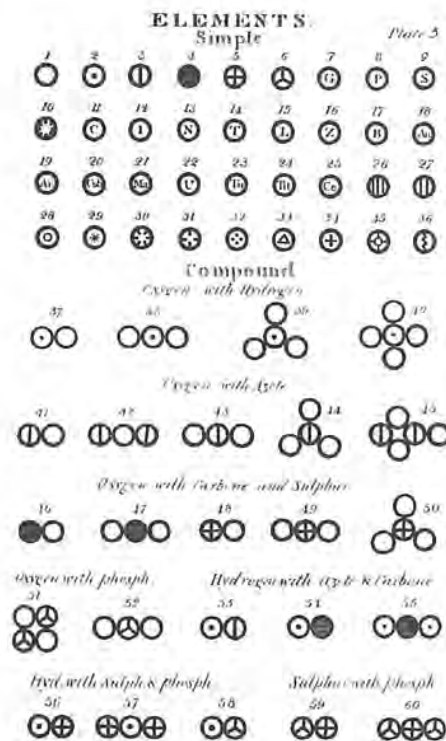
\* 현대화학에서  $H_2O_2$ 로 쓰는 과산화수소 hydrogen peroxide는 돌턴의 책이 나온 지 10년 뒤인 1818년에 발견되었다.

\*\* 돌턴은 기본적으로 라부아지에의 관점에서 시작했다. 그래서 모든 원자는 열소를 포함하고 있다고 가정했고, 열소와 열소가 만나면 서로 배척한다고 추론했다.

에 1 대 2나 2 대 1, 그다음에 1 대 3이나 3 대 1의 식으로 이루어진다고 주장하였습니다.

돌턴의 이러한 생각이 이해는 되지만, 최대 단순성의 규칙에 어떤 설득력 있는 근거는 없었습니다. 그야말로 가설이었고, 직접적 증거는 찾을 수 없었습니

다. 돌턴이 제시했던 이론적 이유도 보편적인 설득력이 부족했습니다. 이 시점에서, 화학을 좀 배운 독자들은 아보가드로 Amedeo Avogadro가 돌턴의 잘못된 이론을 수정했고, 그리하여 현대화학의 기초를 확립했다고 기억할 것입니다. 물이  $H_2O$ , 또 수소가  $H_2$ , 산소가  $O_2$ 라는 분자식은 다 아보가드로가 처음으로 제안한 것입니다. 그러나 그것은 간단한 문제가 아니었습니다. 1811년에 발표된 아보가드로의 이론은 돌턴을 포함한 대부분의 과



▲ 그림 8-3 돌턴의 원자 분자 그림

학자들에게 거부당했고, 일반적으로 받아들여지기까지 약 50년이 걸렸습니다. 왜 그랬을까요? 아보가드로의 이론이 처음부터 잘 알려지지 못하고 그냥 묻혀버렸다고 이야기하는 사람들도 있습니다. 그 이론을 아보가드로가 시골 학교 선생님 시절에 펼치기 시작한 것도 사실이고, 또 당시 이탈리아가 그리 과학의 중심지가 아니었던 것도 사실입니다. 그러나 중요한 논문은 아보가드로가 프랑스어로 써서 파리에 학회지에 발표했기 때문에, 그의 아이디어

가 전혀 알려지지 않고 무시되었던 것은 아닙니다. 아보가드로의 논문을 다들 읽지 않은 것이 아니라, 읽고서 거부한 것입니다. 우리는 그 거부의 이유를 이해할 필요가 있습니다.

아보가드로의 분자이론은 프랑스의 훌륭한 물리학자이자 화학자였던 게이-뤼삭 Joseph-Louis Gay-Lussac 이 발견한 '기체반응 법칙'을 더 깊이 이해하려는 데서 시작되었습니다. 게이-뤼삭은 기체상태의 물질들 간에 화학반응이 일어날 경우, 관련된 기체의 부피가 서로 아주 간단한 정수비를 이룬다는 것을 관찰하였습니다. 예를 들어서 수소가스와 산소가스를 반응시켜서 물이 될 때, 그 두 가스의 부피는 아주 간단하게 딱 2 대 1로 나옵니다. 일산화탄소와 산소도 2 대 1의 부피로 결합해서 이산화탄소를 만들고, 질소와 산소는 여러 가지 비율로 결합할 수 있다고 알려져 있었는데 게이-뤼

삭은 그 결합의 부피 비율이 2 대 1, 1 대 1, 또는 1 대 2라고 밝혔습니다. 이 결과를 본 아보가드로는 그 부피의 비율에서 분자식을 그대로 읽을 수 있다는 착상을 했습니다. 그렇다면 물의 분자식이 즉각  $H_2O$ 로 나옵니다(그림 8-5 참조). 어떤 기체건 부피가 두 배면 거기에 들어 있는 입자의 수도 두 배일 것이다, 즉 모든 기체의 같은 부피 내에는 같은 수의 입자들이 포함되어 있을 것이라고 가정만 하면 됩니다. 이것을 '동일 부피, 동일 입자 수' 가정이라고 이름 붙여봅시다.\* 아보가드로가 이렇게 그림을 그렸던 것은 아닌데, 제가 한번 그려보았고 화학 교과서에도 이런 식으로 자주 나옵니다.

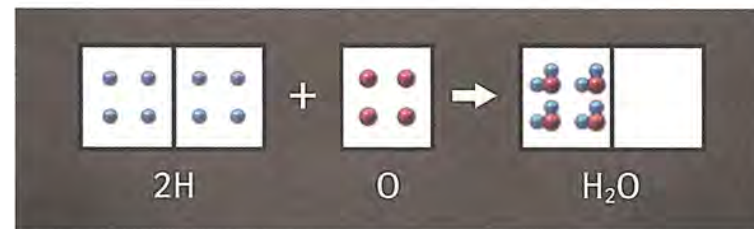
\* 미국의 과학사학자 켄 Alan Rocke 은 기억하기 쉽게 이 가정을 '이븐EVEN'이라고 명명하였다. 'Equal Volume, Equal Number'의 약자이다. 아보가드로의 가설이라고도 하는데, 아보가드로가 제의한 가설은 이것 한 가지가 아니기 때문에 그렇게 호칭하는 것은 적합하지 않다.

#### 아보가드로 Amedeo Avogadro, 1776-1856

이탈리아 북부 피드몬트 지방의 귀족 집안에서 태어났습니다. 원래 법학을 공부했는데 진짜 관심은 수학과 물리학에 있어서 나중에 독학으로 과학공부를 했습니다. 과학으로 학위도 못 땄지만 30대 초반에 북부 토리노와 밀라노 사이에 있는 베르첼리 Vercelli 라는 소도시에 있는 왕립 전문학교 과학 선생으로 자리를 잡았습니다. 1820년에 토리노 대학에서 수리물리학 석좌교수로 모셔갔는데, 이탈리아에서는 처음으로 그 분야에서 생긴 교수직이었습니다. 초기에 정치적 이유로 파면 위기에 몰렸으나 다행히 모면했고, 은퇴할 때까지 그곳에서 교편을 잡았습니다.



▲ 그림 8-4 아보가드로  
© Anton at Wikimedia.org



▲ 그림 8-5, 게이-뤼삭의 기체반응 법칙, 물의 경우 © CH. Bom

그러면 이 시점에서 물분자가  $H_2O$ 로 밝혀지고 돌튼의 HO 분자식은 사실무근이었던 것으로 판명되면서 문제가 해결되었으리라고 생각할지 모르겠습니다. 그러나 논쟁은 여기서 시작되었지, 전혀 끝나지 않았습니다. 이 그림을 보고 짐작할 수 있겠지만, 한 가

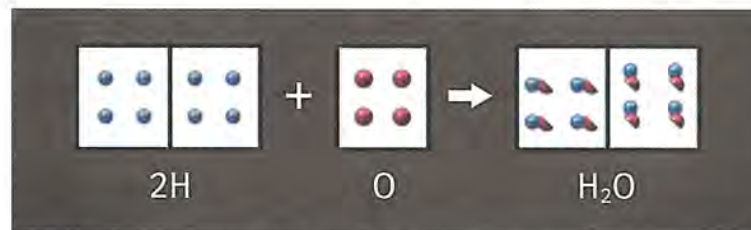


\* 현대화학에서 1몰에 입자가 몇 개 들어 있는가 하는 것을 나타내는 '아보가드로의 수'는  $N=6.02 \times 10^{23}$ 이다. 아보가드로가 밝혀냈던 숫자는 아닌데, 이 그림에서는 그렇게 엄청난 수의 입자를 그릴 수 없어서 네 개로 생략하였다.

지 큰 문제가 있었습니다. 아보가드로의 가설에 따르면, 이 반응으로 생긴 물이 기체상태(수증기)로 나온다면 그 부피는 반응 전에 있었던 산소의 부피와 같아야 합니다. 왜냐하면 산소 하나에

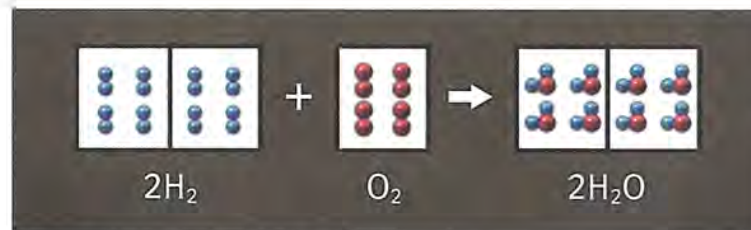
수소가 두개씩 붙어서 생기는 그 물의 입자 수는 처음 시작한 산소입자의 수와 같으니까요(이 그림에서는 네 개).\* 그러면 그 수증기의 부피도 처음에 시작한 산소가스의 부피(그림에서 한 칸)만큼밖에 안 되어야 할 텐데, 실험을 해보니 그 두 배의 부피가 나왔습니다. 여기서 보통 사람 같으면 '아, 내 가설이 멋진 것 같았는데 틀렸구나' 하고 다른 길을 찾았을 것입니다. 나중에 전 유럽에서 가장 존경받는 화학자가 된 스웨덴의 베르셀리우스도 아보가드로와 비슷한 생각을 했었고 물의 분자식도  $H_2O$ 라고 동의했지만, 이러한 실험결과를 보고 그 '동일 부피, 동일 입자 수' 법칙은 산소나 수소처럼 순수한 물질에만 적용되고, 물 같은 화합물에는 적용되지 않는다는 결론을 내렸습니다.

그러나 아보가드로는 고집이 셧습니다. 원래의 자신의 가설을 지키면서 실험결과를 설명하기 위한 궁리를 시작했습니다. 물의 입자수를 두 배로 들려야 하니까, 산소와 수소 원자들이 결합을 하고 나서 그 합친 것이 두 개로 쪼개질 것이라고 하면 어떨까요?



▲ 그림 8-6 아보가드로의 가설을 살릴 수 있나? © CH. Bom

그런데  $H_2O$ 를 두 개로 쪼갰다면 하나밖에 없는 산소원자가 두 동강이 나야 하는데, 파괴되지 않는 물질의 기본단위라고 했던 '원자'의 원래 의미에 전혀 맞지 않는 일이었습니다. 여기서 또 평범한 사람 같으면 포기했을 텐데, 아보가드로는 고집을 부리고 또 한 가지 가설을 집어넣었습니다. 산소원자가 깨지는 상황을 막기 위해, 처음부터 산소와 수소가 같은 원자 두 개씩 붙어 있는 이원자 분자(biatomic molecule)로 형성되어 있다고 가정하는 것입니다(그림 8-7 참조). 그러면 물분자는 처음 형성될 때  $H_4O_2$ 가 되고, 그것이 둘로 쪼개지면  $H_2O$ 가 두 개 형성되지요. 그렇게 다시 그림을 그려보면 우리 학생들이 달달 외우는 현대적 화학식이 나옵니다.



▲ 그림 8-7 아보가드로의 이원자 분자 가설 © CH. Bom

이 설명을 거치고 나면, 아마 왜 당시 다른 과학자들이 아보가드로 이론에서 등을 돌렸는지 이해가 될 것입니다. 수소나 산소가 원자 두 개씩 모여진 이원자 분자로 형성되었다는 직접적인 증거도 없었고, 물분자가 형성된 후에 쪼개진다는 직접적 증거도 없었습니다. 아보가드로 이론의 시발점인 '동일 부피, 동일 입자 수' 법칙 자체에도 직접적 증거가 없었습니다. 그러니까 처음부터 끝까지 그냥 다 지어낸 이야기라고 생각되었을 것입니다. 그것도 이탈리아 시골에서 갑자기 화학의 '화' 자도 모를 것 같은 사람이 나타나서, 아무 확실한 근거도 없이 가설 위에 임시방편으로 또 가설을 얹었는데, 소설 쓰기도 아니고 과학적 신빙성이 전혀 없어 보였을 것입니다.

수소나 산소 원자가 두 개씩 붙어서 수소가스와 산소가스를 이루는 분자가 되어 있다고 하는데, 그러면 왜 원자가 두 개까지만 붙고 세 개, 네 개, 더 나아가서 무한정으로 붙지 않을까요? 이것은 또 당시 가장 유력했던 화학적 결합에 대한 이론으로 볼 때는 말도 안 되는 이야기였습니다. 19세기 초반에 가장 지배적인 이론은 전기화학을 기반으로 했는데 베르셀리우스가 체계화했고, 영국의 데이비도 그와 비슷한 이론을 영향력 있게 펼쳤습니다. 기본적으로, 원자들이 서로 당기는 것은 이미 정전기학에서 잘 알려진 원리대로 양전하와 음전하 사이의 인력 때문이었습니다. 수소원자는 양전하를 띠고 산소원자는 음전하를 띠어서 서로 잡아당겨 결합하고 물분자를 형성한다는 것이지요. 그렇다면 수소원자 둘을 옆에 놓으면 서로 전하가 같기 때문에 밀어내서 떨어지지, 절대 붙을 수는

없다고 본 것입니다(그림 8-8 참조). 같은 종류의 원자들이 서로 붙는 것은 그 후 100년쯤 지나서 전자가 발견되고 또 양자역학이 나오고서야 설명이 된 공유결합(covalent bond)의 형태인데, 당시 이론체계에서는 상상이 안 되는 것이었습니다.



▲ 그림 8-8 화학적 결합의 전기화학적 설명

## 원자에 대한 실재론 논쟁

그런데 아보가드로의 이론이 그렇게 실패했다면, 과학자들은 어떻게 물이  $H_2O$ 라는 결론에 이르렀을까요? 이것이 너무 궁금해서 저는 화학적 원자론의 역사를 자세히 들여다보았습니다. 1810년대 당시의 상황을 보면, 원자론이 더 이상 진전될 가망이 전혀 안 보이는 상태였습니다. 돌튼도 아보가드로도 각각 이론적 어려움을 겪으면서 막다른 골목에 다다른 분위기가 되니, 그에 대한 반동으로 그런 관측 불가능한 원자나 분자에 대해 증명할 수도 없는 가설을 세우고 논의하는 일은 과학에서 하지 말자는 움직임이 일기 시작했습니다. 경험적으로 확실히 알 수 없는 것을 과학자가 알려고 하는 것은 헛되다는 입장을 갖고, '원자 그리기'에 원칙적으로 반대하는 과학자들이 많이 나왔습니다. 5장에서 설명했던 과학철학



\* 사실 돌턴이 발표한 산소의 원자량은 정확히 8이 아니고 5에서 7까지로 계속 수정되었다. 실험이 정밀하지 못했기 때문이다.

의 실재론 논쟁이 과학자들 사이에서 일어난 것입니다.

과학이론의 내용이 우리가 경험할 수

있는 범위에 국한되어야 한다는 것을 철학용어로 실증주의라고 합니다. 다시 물의 예로 돌아가보면 우리가 실험을 해서 직접 관측할 수 있는 내용은, 부피는 일단 제쳐놓고 질량을 볼 때 수소 1그램이 있으면 거기에 산소 8그램이 합쳐져 물이 9그램 생긴다는 것뿐입니다. 그래서 1 대 8의 질량 비율이 나오는데, 돌턴은 이를 수소원자와 산소원자 자체의 질량(즉, 원자량)이 서로 1 대 8의 비율이고, 그 원자들이 1 대 1로 결합한 결과라고 생각했습니다.\* 반면 아보가드로는 수소와 산소의 원자량 비율은 1 대 16인데 물이 형성될 때 수소원자 두 개가 산소원자 하나와 합쳐지므로, 우리에게 관측되는 질량 비율은 수소 대 산소가 2 대 16, 즉 1 대 8이 되는 것이라고 했습니다.



▲ 그림 8-9 돌턴 대 아보가드로

양쪽 다 각각 일관성이 있고, 철학에서 말하는 '이론 미결정성' 상태를 보여줍니다. 양쪽에서 받아들이는 관측의 내용은 똑같습니다. 두 이론 다 주어진 관측내용을 설명할 수 있습니다. 그러면 그중 어느 이론이 옳은지 판단할 수 없는 상황이 벌어집니다. 이 상

황에서 실증주의자들은 그 두 이론 중에 무엇이 옳은가, 거창하게 말해서 '무엇이 진리인가'로 다투지 말고 그냥 관측할 수 있는 이야기만 하자는 입장을 보입니다. 물의 예로 돌아가보면, 무슨 이유인지는 모르지만 수소와 산소가 항상 1 대 8의 질량비로 결합하는 규칙성을 관측으로써 확립하고 거기서 끝내자고 했던 것입니다. 20세기 초반에 유행했던 소위 논리실증주의에 의하면, 경험적 증명이 불가능한 말은 의미조차도 없으니 말하지도 말아야 합니다.

19세기 화학으로 돌아가면 한 가지 재미있는 이야기가 있습니다. 당시 프랑스 화학계를 한때 지배하다시피 한 영향력을 가졌던 뒤마(Jean-Baptiste Dumas)는 이렇게 이야기했습니다: "내 마음대로 할 수 있다면, '원자'라는 단어를 과학에서 지워버리겠다. 경험할 수 없는 것을 지칭하는 말이기 때문이다. 화학에서는 우리가 경험 밖으로 나가서는 안 된다."<sup>2</sup> 그런데 정말 1830년대 프랑스의 화학 교과서에서는 원자 개념이 삭제되었었다고 합니다. 뒤마가 개인적인 영향력을 발휘해서 그랬던 것인지는 확실치 않지만, 어쨌든 그 사람의 심정에 동조하는 세력이 꽤 있었다는 이야기입니다.

그러나 모든 사람들이 그런 실증주의적 입장으로 돌아갔던 것은 아닙니다. 당시는 원자를 직접 관측할 수 있는 능력이 전혀 없었고 그런 한계를 다들 인정했지만, 원자와 분자의 모델을 만드는 시도는 여러 군데서 계속되었습니다. 그중 돌턴이나 아보가드로처럼 보이지 않는 것에 대한 진리를 추구하기 위한 목적으로 가설을 세우는 사람들도 있었는데, 이는 철학적으로 실재론적인 입장입니다. 돌턴과 아보가드로 두 사람의 구체적인 과학적 의견은 서로 달

랐지만 원자가 진짜 어떻게 생겼고 어떻게 결합하는지를 알아내야 한다는 철학적 입장은 공유했었습니다. 5장에서 설명했듯이, 실재론은 좋은 과학이론에서 말해주는 내용은 관측 불가능한 것들도 글자 그대로 참이고, 아니면 적어도 그런 참된 이론을 세우려는 노력을 해야 한다는 입장입니다. 그런데 더 재미있는 것은 실증주의자도 실재론자도 아니면서, 진리의 여부와 상관없이 보이지 않는 것들을 시각화하는 모델을 만들었던 과학자들이 있었다는 겁니다. 이런 시도는 유기화학 분야에 특히 많았습니다.

## 유기화학에서 내려준 H<sub>2</sub>O의 결론

결론부터 말하자면, 물의 H<sub>2</sub>O 분자식을 결국 굳혀준 것은 유기화학에서 성행했던 분자모델 작업이었습니다. 역설적인 이야기입니다. 유기화학(organic chemistry)이란 원래 동식물에서 추출된 복잡한 물질을 다루는 데서 출발했고, 물 같은 것은 단순한 분자이고 무기화학(inorganic chemistry)에서 다루는 물질인데, 결국 무기화학만으로는 앞서 언급했던 이론의 비결정성이 도저히 깨지지 않았던 것입니다. 비유를 해보자면, 우리가 퍼즐(jigsaw puzzle)을 맞출 때 몇 조각만 갖고 보면 여러 가지 가능성이 살아 있기 때문에 해답이 명확히 나오지 않습니다. 많은 조각들을 갖고 더 맞추어보아야, 처음에는 그럴듯했던 많은 그림들이 대부분 다 아니라는 것이 밝혀집니다. 화학도 그런 식이었습니다. 무기화학에서는 비교적 간단한 분자들

의 형성으로 그치는 반면, 유기화학에서는 몇 가지 안 되는 종류의 원자들(기본적으로 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N))이 많은 수가 모여서 아주 복잡한 분자를 다양하게 형성합니다. 그런 다양한 분자들을 모두 일관성 있게 해석할 수 있는 이론체계는 많지 않았습니다.

구체적인 예를 하나 들어서 설명해보겠습니다. 비교적 단순한 유기화합물 중에, 술의 주성분인 에틸알코올(ethyl alcohol (에탄올 ethanol))과 에테르(ether\*)가 있습니다. 에테르는 휘발성이 있고 냄새가 강한 물질로, 옛날에는 수술용 마취제로 쓰였는데 요즘은 여러 가지 용도의 용매로 쓰이고, 어떤 데서는 마약으로도 쓰인다고 합니다. 이 두 물질의 화학적 구성을 화학식으로 이렇게 씁니다.

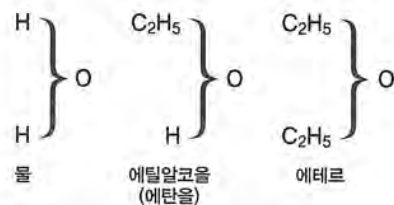
- 에틸알코올      C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O
- 에테르            C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O

이런 식만 봐도 요즘 말로 머리에 쥐가 나고 고등학교 때 싫어하던 화학시간이 악몽처럼 떠오르는 독자도 많을 것입니다. 저도 사실 학교 다닐 때는 화학, 특히 유기화학을 참 싫어했습니다. 원리로 푸는 과학이 아니라 암기과목처럼 느껴졌기 때문입니다(한국 교육을 비판하는 것은 아닙니다. 그런 화학을 저는 미국 유학을 가서 배웠습니다). 그런데 재미있는 것은 침단을 걸었던 석학들도 초기에는 유기화학을 다루면서 머리에 쥐가 났다는 겁니다. 여러 가지 식물과 동물

\* 에테르 물리학에서 가상적으로 이야기했던 빛과 전자기파의 매개체인 에테르와는 전혀 다른 내용이다. 그 에테르는 ether 또는 aether라고도 표기한다.



에서 추출된 수백, 수천 가지의 새로운 물질들이 발견되고, 나중에는 인공적인 합성물까지 많이 나와서 고층을 겪었습니다. 그 수많은 화합물들이 혼잡하게 질서 없이 나열되어 있는 것이 마치 밀림(jungle)과 같다고들 한탄했습니다. 그 밀림을 정복하려면 일단 수많은 물질들을 간편하고 현명하게 분류해야만 했습니다. 물질의 성질로 구분할 수도 있겠지만, 화학자들 사이에는 점점 분자의 구성내용을 기반으로 분류하자는 움직임이 일어났습니다. 그중 가장 유망한 시도가 19세기 중반에 등장한 '유형 이론(lype theory)'이었습니다.



▲ 그림 8-10 물의 유형을 지닌 분자들

아까 들었던 예로 다시 돌아가보면, 이 에틸알코올과 에테르는 둘 다 '물 계통', 또는 '물의 유형(water type)'이라고 지칭했습니다. 그리고 그것을 그림 8-10과 같은 방식으로 그림으로 그려보았습니다. 물을  $H_2O$ 라고 전제하고, 그 구조는 산소원자가 중간에서 수소 원자 하나씩을 양쪽으로 잡고 있다고 나타낸 것입니다. 그것이 물 유형의 기본형이고, 여기서 수소원자를 하나씩 빼고 다른 것을 끼워 넣으면 이 같은 유형의 다른 분자들을 계속 만들어낼 수 있다고 생각했습니다. 그래서 물에서 수소 하나를 빼고 그 자리에 에

틸기(ethyl radical,  $C_2H_5$ )를 집어넣으면 에틸알코올이 되고, 메틸기(methyl radical,  $CH_3$ )를 끼우면 메틸알코올이 되는 식입니다. 이런 식으로 무궁무진하게 만들어갈 수 있습니다. 에틸알코올( $C_2H_6O$ ), 에테르( $C_4H_{10}O$ )라고 썼을 때는 전혀 질서 없어 보였지만, 유형이론을 기반으로 분자식 도해를 보면 눈에 확 들어옵니다(그림 8-10 참조). 공식으로도 이렇게 알아보기 쉽게 써볼 수 있습니다.

• 물	$H - O - H$
• 에틸알코올	$C_2H_5 - O - H$
• 에테르	$C_2H_5 - O - C_2H_5$

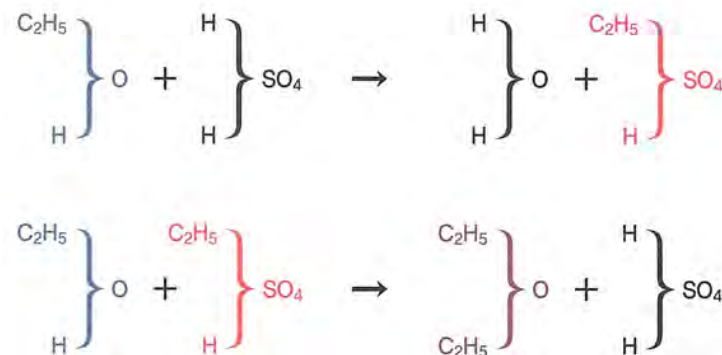
이런 식으로 유형들을 구성해서 여러 가지 화합물을 종류별로 모아 구분하며 질서를 찾으려 하였습니다. 물의 유형 외에 수소 유형, 암모니아 유형, 염산 유형 등도 제안되었습니다.

그런데 이렇게 모델을 잘 만들다 보니까 이런 유형들이 허구적인 것만은 아니라고들 느끼게 되었습니다. 예를 들어 오랫동안 화학자들이 주목했던 '에테르화(etherification)'라는 현상이 있습니다. 이 에테르화는 스페인에서 활동하던 라몬 룰(Ramon Lull)이라는 연금술사가 13세기에 이미 발견했다는 화학반응인데, 19세기 중반까지도 참 신기하게 여겨졌던 현상입니다. 에틸알코올을 황산과 섞으면 에테르로 변하고, 그 부산물로 물이 나옵니다. 그런데 그 과정에서 황산은 전혀 변하지도 않고 없어지지 않고, 그대로 있습니다. 그러나 황산이 없으면 에틸알코올이 에테르로 변하지 않습니

다. 이상하지요. 촉매작용(catalysis)에 의한 것인데, 당시에는 잘 이해가 되지 않는 신비로운 현상이었습니다. 1850년경에 영국의 유기 화학자 윌리엄슨(Alexander Williamson)이 유형 이론을 사용해서 에테르화의 메커니즘을 참으로 명쾌하게 해석해냈습니다.

윌리엄슨은 에테르화 과정을 다음과 같이 설명했습니다(그림 8-12 참조). 에틸알코올은 앞서 말했듯 물 유형의 분자로  $H_2O$ 에서 수소 하나는 남아 있고 하나는 에틸기로 교체한 상태입니다. 거기에 황산( $H_2SO_4$ )이 다가옵니다. 황산의 분자도 좀 비슷하게 생겼는데,  $SO_4$ 가 중심에 서서 양옆으로 수소 하나씩을 잡고 있는 구조입니다. 에틸알코올과 황산, 두 분자가 만나면 수소 하나와 에틸기를 교환합니다. 그 결과로 에틸알코올은 에틸기를 잃고 수소를 받아서 물이 되고, 황산은 에틸기를 받아서  $C_2H_5-SO_4-H$ 라는 이상한 '에틸화 황산'으로 변합니다(그림에 빨간색 표시된 분자입니다). 이 '에틸화 황산' 분자는 다른 새로운 에틸알코올 분자를 만나서 또 교환

을 합니다(그림 8-12의 두 번째 줄). 받아놓았던 에틸기를 그 새로운 에틸알코올 분자에 주고, 그 대신 수소원자를 받습니다. 그러면 에틸알코올은 산소가 에틸기 두 개를 잡고 있는 에테르가 되고, 황산은 원상복구됩니다. 결과적으로 황산은 자기 자신은 변하지 않고 에틸알코올에서 물을 떼어내고 에테르로 만들어주는 촉매작용을 한 것입니다. 말이 됩니까. 우리가 알고 있는 현대적 이론과는 좀 다르지만, 정말 멋지고 설득력 있는 이야기였습니다.



▲ 그림 8-12 윌리엄슨의 에테르화 설명

유형 이론은 분류를 위해 만들었지 화학반응 과정을 설명하려고 만든 것은 아니었는데 참 기특한 일이었습니다. 이런 식으로 진상을 표현한다고 생각하지 않고 만들었던 모델들이 참으로 유용한 역할을 해내는 경우가 많이 생겼습니다.<sup>3</sup> 그렇다면 그렇게 유용한 모델들이 전적으로 허구일 리는 없고 어느 정도라도 관측 불가능한 진상을 표현하고 있지 않느냐는 의견이 점차 우세해졌습니

#### 윌리엄슨 Alexander Williamson, 1824-1904

스코틀랜드계의 영국 사람으로, 독일과 프랑스에서 공부한 후 런던 대학(현 UCL, University College London)에서 1849년에서 1887년까지 교편을 잡았습니다. 팔 하나를 못 썼고 눈 한쪽이 안 보였는데도 기가 막힌 능력으로 실험화학 교수(Professor of Practical Chemistry)로 활동했습니다. 1863년에 런던 대학에 처음으로 일본 유학생 다섯 명이 가서 이 윌리엄슨 교수의 지도를 받았는데 그중 한 명이 바로 이토 히로부미였습니다.



▲ 그림 8-11 알렉산더 윌리엄슨  
© Wikimedia.org



다. 그런데 윌리엄슨의 물 유형 이론이 대강 분자구조의 진상을 표현하고 있다면, 그 이론의 기반이 되었던 물의 화학식  $H_2O$ 도 그냥 굳어집니다. 성공적인 모델을 만들 때 전제조건으로 한 내용은 진실로 여겨야 한다는 추론인데, 논리적으로 엄격하게 볼 때는 허점이 있지만 실용적으로는 강한 설득력을 가지고 있습니다.

이런 식으로 19세기 중반에 만들어졌던 유용한 원자-분자 모델 중에 아주 재미있는 예가 두 가지 있습니다. 하나는 현대과학에서도 그리 낯설지 않은 것으로, 1860년대에 영국 런던에서 화학을 가르쳤던 독일 사람 호프만 August Hofmann 이 강의할 때 쓰려고 만들었던 것입니다. 그림 8-13에 나온 대로 색색가지 당구공에 구멍을 뚫은 후 막대기를 꽂아서 장난감을 조립하듯이 만든 것입니다(사실은 당구공이 아니라 영국에서 하는 크로케 공이었는데, 비슷합니다). 이런 모델을 만들 때 탄소원자에는 막대기 네 개, 질소에는 세 개, 산소에는



▲ 그림 8-13 막대기와 공을 사용한 호프만의 분자 모델 photograph from the Royal Institution © Henry Rzepa at Wikimedia.org

는 두 개, 수소에는 한 개가 꽂히도록 했습니다. 이런 식의 원자, 분자 모델은 현재 까지도 화학교육에서 많이 사용되고 있습니다. 왓슨과 크릭이 DNA의 이중나선 구조를 제시했을 때도 이런 식의 모델을 만들어서 보여주었고, 또 여러 가지 복잡한 단백질의 구조를 연구하는 사람들도 이런 모델을 사용해서 실제로 추론하는 데 도움을 받았습니다.

<i>Derivatives of Marsh Gas.</i>	Kekulé's graphic formulæ.	Modern structural formulæ.	Modern graphic formulæ.
Marsh gas .		$CH_4$	
Methyl chloride .		$CH_3 \cdot Cl$	
Carbonyl chloride		$Cl \cdot CO \cdot Cl$	
Carbonic anhydride		$CO_2$	$O=C=O$
Prussic acid . .		$H \cdot CN$	$H-C \equiv N$
<i>Derivatives of Ethane.</i>			
Ethyl chloride .		$CH_3 \cdot CH_2 \cdot Cl$	
Ethyl alcohol .		$CH_3 \cdot CH_2 \cdot OH$	
Acetic acid . .		$CH_3 \cdot CO \cdot OH$	
Acetamide . .		$CH_3 \cdot CO \cdot NH_2$	

▲ 그림 8-14 케쿨레의 소시지 모델 from T. M. Lowry, 'Historical Introduction to Chemistry', revised edition (London: Macmillan, 1936), p. 440 © T. M. Lowry

또 한 가지, 좀 친숙하지 않을 모델을 소개하겠습니다. 이것은 호프만과 동시대에 아주 저명했던 독일의 유기화학자 케쿨레의 작품입니다. 케쿨레는 벤젠분자의 구조를 고리 모양, 또는 6각형이라고 주장해서 유명해졌지요. 4장에서 말했던 것처럼 뱀이 제 꼬리를 무는 꿈을 꾸고 나서 그 아이디어를 냈다고 해서 지금까지도 과

학사의 전설처럼 전해 내려옵니다. 그런데 그런 모델을 만들기 전에 케쿨레는 다른 형태의 모델을 사용했는데, ‘소시지 모델’이라고 하였습니다(그림 8-14의 예를 보면 더 잘 이해가 될 것입니다). 웬지는 모르지만 탄소원자를 길쭉하게 네 개가 붙은 줄줄이 소시지로 그리고, 질소는 세 개, 산소는 두 개, 수소는 하나로 그렸을 때, 길이가 다른 이 원자들이 단정하게 모여서 빠져나오지 않고 잘 쌓이는 모양이면 안정성 있는 분자가 된다는 것이었습니다. 이를 이론이라고 말하기도 어렵지만 아무튼 케쿨레는 이 모델을 이용해서 많은 화학적 사고를 전개했고, 이 모델이 너무 기특한 나머지 자신이 집필한 유기화학 교과서에서도 사용했습니다.

당구공에 낀 막대기의 개수나 소시지의 길이나, 두 가지 다 근대화학에서 이야기하는 원자가(valence/valency)의 개념을 나타낸 것입니다. 물론 호프만이 원자가 정말로 당구공같이 생겼거나 거기서 막대기가 나와서 다른 원자와 연결되어 있다고 믿었던 것은 아닙니다. 또 케쿨레가 (아무리 소시지를 좋아하는 독일 사람이었다고 해도) 원자가 정말 길쭉하게 각기 다른 길이로 생겼다고 믿었던 것도 아닙니다. 그렇지만 그런 모델들을 통해서 여러 종류의 원자들이 또 다른 원자 몇 개와 결합할 수 있는지를 표현한 것입니다. 처음에는 그런 모델에 대한 실재론적 태도가 아주 조심스러웠습니다. 케쿨레가 벤젠 구조의 모델을 만들어놓고도, 이렇게 말했습니다: “화학적 관점에서 볼 때, 원자라는 것이 존재하는지 안 하는지는 별로 중요하지 않다. 그런 논의는 형이상학에서 할 일이다.”<sup>4</sup> 자기는 모델을 만들 뿐이라고 한 것이지요.

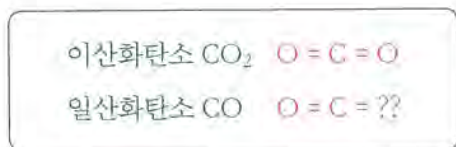
그렇게 조심스럽게 표현되기 시작했던 모델과 이론들이 점차 굳어졌습니다. 어느 한순간 갑자기 진리로 받아들여진 것이 아닙니다. 1850년대, 60년대를 지나면서 이런 모델들이 정말 훌륭하게 적용되고 간편하게 쓰여지면서 원자가의 개념이 결국 근대화학의 기초로 정립되었습니다. 물분자가  $H_2O$ 라는 등의 아주 기본적인 이야기도 원자가로써 설명되면서 그때 가서야 겨우 대부분의 과학자들이 동의하였습니다. 산소의 원자가가 2, 수소의 원자가는 1이라고 하면 물의 분자구조는  $H_2O$ 일 수밖에 없다는 것이지요. 산소는 막대기가 두 개 있고 수소는 하나밖에 없다면 산소와 수소가 서로 결합하는 구조는  $H_2O$ 이지  $HO$ 일 수는 없었던 것입니다. 돌튼이 원자이론을 1808년에 처음 발표한 지 약 반세기나 지난 후에 그렇게 결론이 났습니다. 정말 파란만장한 역사였습니다.

그런데 1860년경에 그렇게 난 결론도 절대적으로 확실한 것은 아니었습니다.\* 원자가로 깨끗하게 설명할 수 없는 경우가 여기저기서 나왔습니다. 한 가지 예를 들자면 두 가지 산화탄소를 생각해봅시다. 탄소가 연소할 때 주변에 산소가 풍부하면 이산화탄소  $CO_2$ 가 형성되고, 그렇지 않을 경우 일산화탄소  $CO$ 가 나올 수 있습니다. (옛날에 많은 사고의 원인이 되었던 연탄가스의 독성은 일산화탄소로 인한 것입니다.) 이 두 가지 분자 중에서 이산화탄소의 구조는 원자가로써 설명이 잘됩니다. 탄소

\* 원자가만 알아서는 분자구조를 완전히 결정하지 못한다. 예를 들어 산소의 원자가가 2, 수소의 원자가가 1이라고 동의해도 그 원자들이 합쳐져서 이루는 분자구조는  $H_2O$ 일 수도 있지만  $H_2O_2$ 일 수도 있다(현대화학에서 과산화수소의 구조는  $H-O-O-H$ 로 표시한다).



의 원자가가 4이고 산소의 원자가는 2니까, 탄소원자가 중앙에 있고 양쪽에 산소 하나씩을 이중 결합(double bond)으로 잡고 있다고 하면 잘 이해가 됩니다(그림 8-15 참조). 그런데 일산화탄소의 구조는 그렇게 설명할 수가 없습니다. 아무리 모델을 가지고 이리저리 궁리해봐도, 탄소가 가진 '막대기' 네 개가 다 어디로 가서 붙어야 할지 답이 잘 나오지 않습니다. 정말 당시에 해결하지 못했던 문제입니다. 이것이 가장 극명한 예이고, 여러 가지 다른 경우에도 원자를 기반으로 한 설명이 석연치 않았습니니다. 대부분의 경우에 그럴듯한 설명을 내놓았다는 것이지 무조건 믿을 수 있는 완벽한 이론체계는 아니었습니다.



▲ 그림 8-15 산화탄소의 구조 설명의 어려움

또 베르셀리우스의 전통을 따라서 화학반응이 왜 일어나는지를 설명하고 싶어했던 화학자들은 이런 식의 구조이론에서 아무런 대답도 얻지 못했습니다. 유기화학 분야는 원자들이 왜 서로 붙어 있는가는 생각하지 않고, 그 붙어 있는 형태만을 밝히는 구조이론이 점점 지배하게 되었고 화학반응의 이유와 과정에 대한 설명을 원하는 사람들은 결국 그 분야를 떠나게 되었습니다. 무기화학 분야에서는 그런 설명을 계속 시도했고, 또 물리화학(physical chemistry) 분

야가 새로 생겨나서 열역학, 분자운동 이론, 통계역학, 전기화학 이론 등 물리학적 이론을 화학에 잘 적용한 반면, 유기물에 대한 내용은 거의 손도 못 대는 그런

상황으로 발전했습니다.\* 모든 분야에서 다 원자를 실재론적으로 다루면서도, 서로 상당히 다른 원자의 개념을 발달시켰고, 서로 아주 다른 이론적·실험적 행위를 실행하였습니다. 그러니까  $\text{H}_2\text{O}$ 라는 분자식과 그 비슷한 내용에 다 동의를 했다고 해서 화학 전체가 깨끗하게 통일되었던 것은 아니라는 것입니다.

\* 그러나 화학적 결합의 메커니즘을 밝히는 일에는 별 성과를 보지 못했고, 나중에 전자가 발견되고 양자역학 이론이 나온 후에야 조금 진전이 있었다.

## 원자론의 역사가 과학교육에 주는 교훈

재미도 있고, 골치도 아픈 긴 역사입니다. 진짜 과학연구의 실상은 하나하나 잘 뜯어보면 대부분 이렇게 참 어렵고 복잡하고 신기합니다. 그런데 보통 과학교육에서는 이 중요하고 재미있는 과정을 다 무시하고, 최종 결과만을 가르치는 데 집착합니다. 그래서 잃는 것이 많습니다.

과학자들이 잘 연구해서 나온 결과만 배우면 됐지, 그 결과에 이르기까지 어떤 과정을 겪었는지 하는 골치 아프고 혼동되는 이야기를 일반인이나 학생들이 알 필요가 있냐고 생각하는 사람들도 많을 것입니다. 그러나 제 생각은 정반대입니다. 과학교육은 나중에 과학자가 될 사람만 받는 것이 아닙니다. 1장에서 언급했듯 우

리 사회에서는, 또 대부분의 국가에서는 과학을 의무교육에 포함시켜 모든 사람들이 배우도록 하고 있습니다. 그런데 과학자가 아닌 시민들은 과학이 말해주는 결과는 별로 알 필요가 없다고 저는 생각합니다. 그것이야말로 전문가들에게 맡기고 믿으면 됩니다. 물이  $H_2O$ 라는 것도, 과학연구에는 필수적인 내용이지만 일상생활에서는 쓸모없는 지식이고 비전문가들은 그걸 몰라도 훌륭하게 잘 살 수 있습니다. 보통 시민들이 물이  $H_2O$ 라는 것을 알아서 뭐 하느냐고 심각하게 질문을 던져볼 필요가 있습니다. 학교에서 이러한 것을 안 가르친다고 한번 상상해봅시다. 아마 난리가 날 것입니다—'그런 기초과학도 안 가르치고 무슨 현대사회에 참여하고 기여할 수 있는 시민들을 양성할 수 있겠는가!' 그러나 시민들이 그런 지식을 생전 어디다 써먹을 수 있는지는 정말 확실치 않습니다. 물이  $H_2O$ 라는 걸 몰라서 생활이 잘못될 일이 뭐가 있을까요? 또 물이  $H_2O$ 라는 걸 잘 아는 사람이 그 지식을 한 번이라도 일상적 삶을 사는 데 직접 이용해본 적이 있을까요?

반면 과학자들이 어떤 연구과정과 어떤 사고방식으로 그 결과를 얻어냈는가는 일반인들이 알아야 한다고 생각합니다. 그런 과학방법론의 본질을 알지 못하는 사람이 과학의 결과만 믿는 것은 맹신에 불과하고, 믿지 않는다면 근거 없는 비이성적인 거부입니다. 또 과학의 본질에 대한 감각이 전혀 없는 사람이 과학정책을 세운다고 나쁘다면 그 또한 큰 문제일 것입니다.

주입식 교육은 '삼척동자도 다 아는' 과학적 상식의 습득을 전제로 합니다. 그것 대신 진정한 탐구를 통해 과학적 상식을 학생들이

깨치도록 한다면 전혀 다른 효과가 있을 것입니다. 승자의 관점에서만 이야기하는 위험은 과학사에만 국한되지 않습니다. 과학교육에서도 절실하게 고려할 필요가 있는 문제입니다. 승자의 관점을 비판의식 없이 받아들이도록 하는 것은 주입식 교육과 바로 연결됩니다. 과학교육자들은 창조적 교육의 시도를 여기저기서 많이들 하고 있습니다. 그런데 왜 우리의 교육 실정은 별로 달라지지 않을까요? 제 생각을 단순히 말하자면 이렇습니다. 우리가 창조교육, 탐구교육을 시도한다고 해도, 학생들은 잘 압니다. 그 뒤에 정답이 다 버티고 있다는 것을 말이지요. 결국 물이  $H_2O$ 라는 등의 정답으로 가야 한다고 느끼는 학생들이, 정말 독립적으로 뭔가를 생각해볼 동기를 갖기란 힘들다고 봅니다. 또 교육자의 입장에서는 창조적으로 탐구를 시킨다고 하면서도, 그 과정을 통해 학생이 정답을 알아내지 못하면 안 된다는 조바심을 느낍니다. 다음 장에서는 '물의 비등점'이라는 일화를 통해서, 정답을 정말 한번 버려보는 시도를 하겠습니다.